

選好曲線のあいまいさを考慮した魚類生息場の最適設計支援手法
Decision support method for optimal design of fish habitat
considering ambiguity of preference curves

前田 滋哉

Shigeya Maeda

1. はじめに 魚類の生息環境を保全することは、持続可能な社会の実現にとって重要である。河川や農業用排水路における環境配慮工について学術的・試験的研究^[1]が近年活発になされているが、この種の事業の効果を事前に精度良く予測する研究は、あまりなされていない。著者はHSI（生息場適性指数）^[2]を用いた魚類生息場評価手法と流れの数値解析手法を最適化手法と融合することで、事業効果を高めるための手法を提案している^[3]。しかし、HSIを算出する際に用いる対象魚の選好曲線は魚類個体数という不確実なデータに基づき作成されるのが一般的である。そこで本研究では、魚類生息場の設計支援の中核として、選好曲線の不確実性を考慮した環境配慮モジュール（ブロック）の最適配置問題を考察する。

2. 生息場の適性評価 対象水路区間（対象水域）の路床に複数の六面体ブロックを適切に配置することで、対象魚にとって望ましい水理環境を創造し、対象水域の生態学的価値を最大化する設計問題を定義する。この生態学的価値を平均生息場適性指数(AHSI)^[4]で表す。対象水域を水平方向に三角形要素に分割し、各要素の魚類生息場としての「質」をHSIで表す。AHSIは各要素でのHSI値の、要素面積を重みとした加重平均として、次式で与える。

$$\text{AHSI} = \frac{\sum_{j=1}^{N_E} A_j \text{HSI}_j}{\sum_{j=1}^{N_E} A_j} = \frac{\sum_{j=1}^{N_E} A_j \sqrt{\text{SI}_{d_j} \cdot \text{SI}_{v_j}}}{\sum_{j=1}^{N_E} A_j} \quad (1)$$

ここで、下付添え字 j がついている変数はそれが要素 j での値であることを示し、 N_E = 対象水域内の要素数; A_j = 水面積; SI_{d_j} = 対象魚の要素平均水深に対する適性指数; SI_{v_j} = 対象魚の要素平均流速に対する適性指数である。AHSIは0から1までの値をとり、1に近いほど対象水域の魚類生息場としての価値が高いことを示す。

3. 環境因子の推定 対象水域の水深と流速の支配式として、鉛直方向に積分した定常の運動量方程式と連続式を仮定する。空間座標を x_i ($i = 1, 2$) とし、総和規約を用いると両式は以下のように表せる。

$$U_j U_{i,j} + g \eta_{,i} - \nu U_{i,jj} + \frac{\lambda |W| U_i - \lambda^o |W^o| U_i^o}{h - \alpha h_B + \eta} = 0 \quad (2)$$

$$\{(h - \alpha h_B + \eta) U_j\}_{,j} = 0 \quad (3)$$

ここで、 U_i = 流速ベクトル W の成分 ($i = 1, 2$); U_i^o = 風速ベクトル W^o の成分 ($i = 1, 2$); h = 平均水深; h_B = ブロック高; η = 平均水位からの水面偏差; α = ブロックの有無を示す 0-1 パラメータ; ν = 水平渦動粘性係数; g = 重力加速度; λ, λ^o = 底面、水面摩擦係数である。ブロック導入の影響は、式 (2), (3) で平均水深 h を αh_B だけ減少させることで表している。

4. 目的関数と制約条件 選好曲線は、横軸に環境因子、縦軸に環境因子に対する対象魚の適性指数 SI をとって描いた曲線である。この選好曲線は通常限られた個体数の観測データに基づき推定するもので、対象水域外のものを代用する場合も多い。したがって得られている選好曲線はあいまいである。このことが対象水域の生態学的価値の評価に与える影響を考慮し、ロバスト（頑健）なブロック配置法を開発する必要がある。そのため、本研究では選好曲線を N_c とおり想定し、各選好曲線の確からしさを重み w_c とし、次の合成目的関数を考える。

$$\sum_{c=1}^{N_c} w_c \frac{\sum_{j=1}^{N_E} A_j \sqrt{\text{SI}_{d_j} \cdot \text{SI}_{v_j,c}}}{\sum_{j=1}^{N_E} A_j} \rightarrow \max \quad (4)$$

ここで、下付添え字 c は選好曲線のケースを表

す。また、予算制約として、対象水路に設置するブロック数に上限を設定する。

5. シミュレーション-最適化 式(4)内の各ケースにおける AHSI の評価には、水域内の各要素での水深 d_j , 流速成分 U_j, V_j が必要となる。したがって、仮定したブロック配置の下で支配式(2),(3)を有限要素法で解く。シミュレーション-最適化法により、このような流況シミュレーションを、加重平均 AHSI が最大となるまでブロック配置を更新しつつ実行する。なお、ブロック配置を式(4)の目的関数値が増大するように更新するため、遺伝的アルゴリズム (GA)^[5]を用いる。

6. 計算例 仮想水路区間にブロックを適切に配置することにより、アユの産卵場としての価値を最大化する問題を考える。図1に示すような均一形状のブロックを、図2のような幅4m、長さ20mの直線水路区間に最大15個配置する。AHSIを計算するため、水深と絶対流速それぞれに対するアユの産卵場としての適性指数 $SI_{d_j}, SI_{v_j,1}$ ^[6]を図3のように定める。 $SI_{v_j,2}$ と $SI_{v_j,3}$ は $SI_{v_j,1}$ のグラフをそれぞれ左と右へ0.05m/s平行移動したものととする。また、 $w_1=0.5, w_2 = w_3=0.25$ である。水域上流境界での単位幅流量を $0.27\text{m}^2/\text{s}$, 下流端水面偏差を0(水深6m)とし、GAに基づくシミュレーション-最適化法によりブロック配置の最適化を行った。得られたブロック配置(局所的最適解)の例を図4に示す。水路区間にブロックを最適に導入することにより、平均 AHSI を0.7145から0.7437まで上昇させることができた。

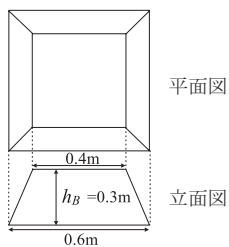


図1：ブロックの形状
Shape of introduced block

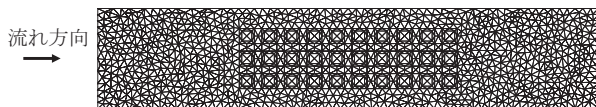


図2：対象水路区間の有限要素分割(平面図)
Finite element discretization of canal section
(Plane view)

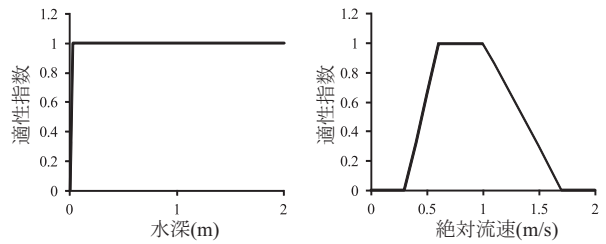


図3：アユの産卵場に関する適性指数
 SI_{d_j} (左), $SI_{v_j,1}$ (右)
Suitability indexes for spawning site of Ayu,
 SI_{d_j} (left panel), $SI_{v_j,1}$ (right panel)

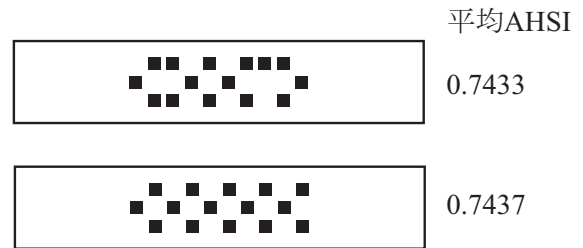


図4：水路区間内のブロック(黒塗四角)の
水平配置と平均 AHSI
Arrangement of blocks in canal section (black
squares) and computed averaged AHSI

7. おわりに 選好曲線のあいまいさを考慮した上で望ましい水理環境を設計するため、水理計算と最適化に基づく手法を開発した。今後、本手法を粗石や魚巢の配置箇所およびサイズの決定に応用し、より柔軟で効果的な環境配慮工の提案ができるようにする予定である。

謝辞 本研究は日本学術振興会科学研究費補助金 若手研究(B) (課題番号 23780245) の補助を受けた。記して謝意を表します。

引用文献 [1] 玉井信行・水野信彦・中村俊六編(1993): 河川生態環境工学. 東京大学出版会, 183-185. [2] 田中章(2006): HEP 入門. 朝倉書店, 5-11. [3] Maeda, S.(2012): GA-based simulation-optimization approach for designing fish habitat in canal. Proceedings of SCIS-ISIS 2012, 89-93, Kobe, Japan, November 20-24. [4] Yi, Y., Wang, Z. and Yang, Z. (2010): Two-dimensional habitat modeling of Chinese sturgeon spawning sites, Ecol. Model., 221, 864-875. [5] 坂和正敏・田中雅博(1995): 遺伝的アルゴリズム. 朝倉書店, 133-140. [6] Nagaya, T., Siraishi, Y., Onitsuka, K. et al. (2008): Evaluation of suitable hydraulic conditions for spawning of Ayu with horizontal 2D numerical simulation and PHABSIM. Ecol. Model., 215, 133-143.